Inżynieria Maszyn, R. 15, z. 1-2, 2010

obrabiarka, błędy,
metody kompensacji

Paweł TUREK[1]
Wojciech MODRZYCKI[1]
Jerzy JĘDRZEJEWSKI[1]

ANALIZA METOD KOMPENSACJI BŁĘDÓW OBRABIAREK

Wytwarzanie produktów o wysokiej jakości wymaga zwiększania dokładności obrabiarek, która w głównej mierze zależy od występujących w nich błędów. Do najważniejszych tendencji w rozwoju współczesnych obrabiarek należy doskonalenie ich konstrukcji dla szeroko pojętego zwiększenia ich wydajności a w tym rozwój metod kompensacji błędów. W artykule przedstawiono analizę najbardziej użytecznych metod kompensacji błędów obrabiarek oraz na przykładach omówiono skuteczność i ograniczenia poszczególnych metod.

1. WPROWADZENIE

Wraz ze wzrostem wymagań dotyczących dokładności wytwarzanych produktów obrabiarkom i systemom obróbkowym stawia się są coraz wyższe wymagania. Kładzie się przede wszystkim nacisk na zwiększanie wydajności przy równoczesnym zwiększaniu dokładności obróbki [17]. Aby uzyskać i utrzymać dokładność na poziomie kilku mikrometrów, należy kontrolować i kompensować szereg różnych rodzajów błędów. Są to m.in. błędy geometryczne, kinematyczne, cieplne, wywołane siłami skrawania itd. Błędy te można istotnie zredukować, ale nigdy nie można ich całkowicie wyeliminować [20]. Zwiększenie dokładności maszyn obróbkowych osiąga się przez doskonalenie ich układów, wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, wzrost dokładności wykonania i montażu poszczególnych elementów składowych maszyny oraz stosowanie metod kompensacji błędów.

Do rozwiązań konstrukcyjnych zwiększających dokładność można zaliczyć m.in. stosowanie materiałów o niskiej rozszerzalności cieplnej i dużej sztywności, konstrukcji termosymetrycznej, wydajnego układu chłodzenia itp. Jednak nawet najlepsze rozwiązania konstrukcyjne nie pozwalają zwykle osiągnąć wymaganej dokładności. Spowodowane jest to głównie stale występującymi zakłóceniami zewnętrznymi i wewnętrznymi, które ograniczają możliwość poprawy dokładności. Z tego względu stosuje się różne metody kompensacji błędów, których wybór zależy od rodzaju błędów, które należy skompensować

[1] Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Politechnika Wrocławska

i od stopnia złożoności obrabiarki. Dzięki zastosowaniu kompensacji błędów można osiągnąć większą dokładność przez korygowanie trajektorii ruchu narzędzia względem obrabianego przedmiotu.

Dokładność obrabiarek można zwiększać zarówno na etapie projektowania maszyny, jak również podczas jej eksploatacji. W tych dwóch obszarach można stosować różnego rodzaju działania (tab. 1).

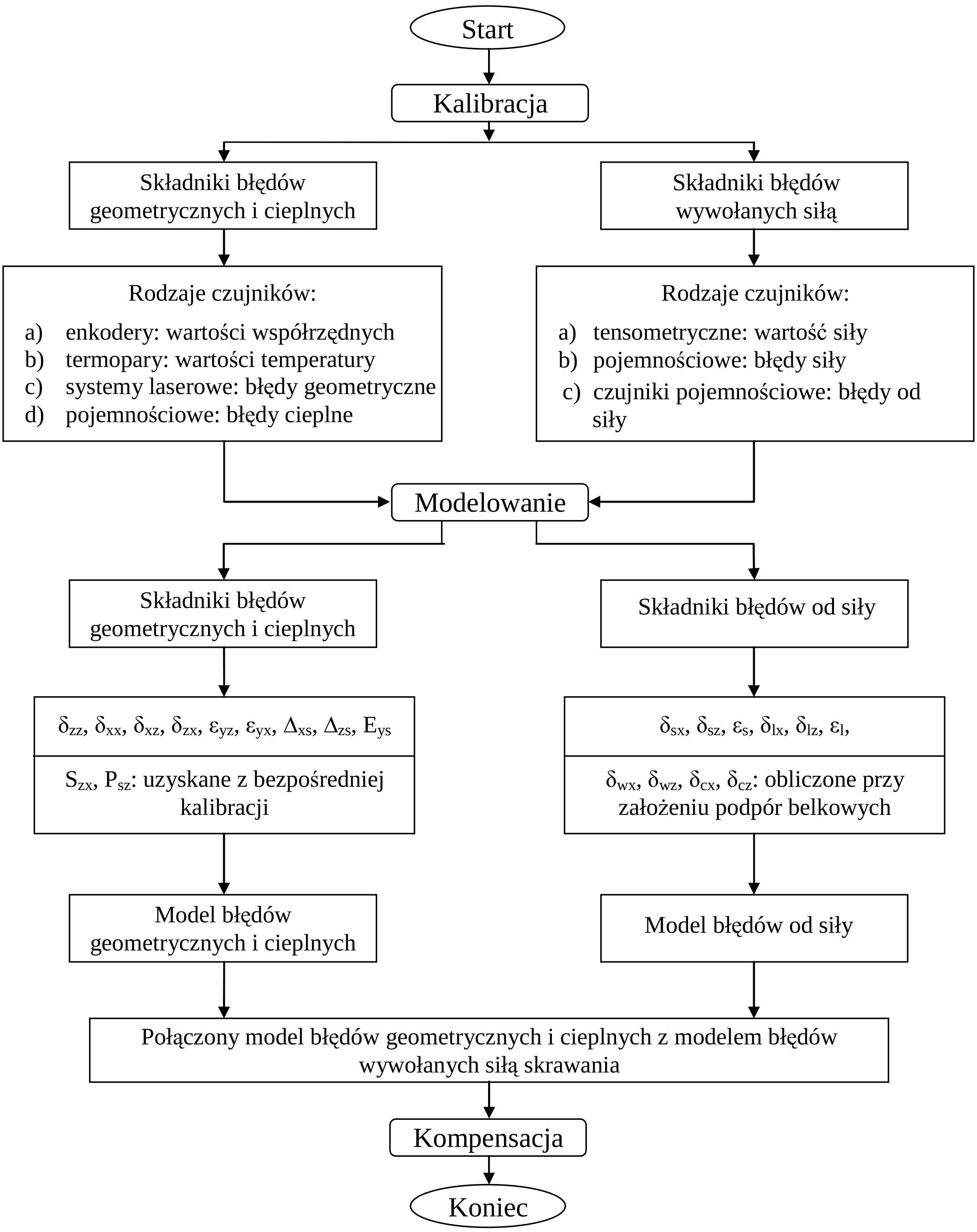
Tabela 1. Obszary poprawy dokładności obrabiarek
Table 1. Areas to improve the accuracy of machine tools

Obszar projektowania	Obszar eksploatacji
• Zwiększanie dokładności podzespołów • Prawidłowy montaż obrabiarki • Minimalizacja źródeł ciepła • Ograniczenie oddziaływania zjawisk cieplnych i termosymetria	• Unikanie zmian prędkości obrotowej w szerokim zakresie • Redukcja zmian temperatury otoczenia • **Zastosowanie metod kompensacji błędów**

Jak pokazuje tab. 1, istnieje wiele sposobów zwiększania dokładności obrabiarek. Wszystkie te metody można zaklasyfikować do jednej z dwóch grup. Pierwsza z tych grup obejmuje rozwiązania, których celem jest minimalizacja błędów. Głównym problemem jest w tym przypadku koszt minimalizacji błędów, który rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem dokładności obrabiarki, co dla maszyn do obróbki precyzyjnej ma bardzo istotne znaczenie i może poddawać w wątpliwość opłacalność takiej metody postępowania. Dlatego coraz częściej do zwiększania dokładności obrabiarek są wykorzystywane też metody drugiej grupy, tzn. metody kompensacji błędów [4]. Opierają się one na wykorzystaniu informacji pochodzących z czujników zamontowanych na obrabiarce i/lub danych wewnętrznych maszyny (np. prędkości obrotowej wrzeciona). Dzięki zastosowaniu odpowiednich algorytmów obliczeniowych możliwe jest wyznaczenie wartości kompensacyjnych dla poszczególnych osi sterowalnej obrabiarki.

Ogólną procedurę kompensacji błędów geometrycznych, cieplnych i pochodzących od sił skrawania przedstawia rys. 1. Implementacja metody kompensacji błędów odbywa się w następujących trzech etapach [15]:

a) **Identyfikacja (kalibracja)**:
analiza struktury maszyny, określenie rodzaju występujących błędów, określenie optymalnej lokalizacji czujników pomiarowych, pomiar poszczególnych błędów składowych w różnych warunkach pracy.
b) **Modelowanie**:
opracowanie modeli błędów składowych, włączenie pojedynczych modeli błędów do kompleksowego modelu błędu obrabiarki.
c) **Kompensacja**:
instalacja systemu kompensacji błędów.



Rys. 1. Ogólna tradycyjna procedura kompensacji błędów geometrycznych, cieplnych i pochodzących od sił skrawania [31]

Fig. 1. General traditional procedure for compensation of geometric and thermal errors and errors caused by cutting forces [31]

2. KOMPENSACJA BŁĘDÓW W OBRABIARKACH

2.1. KONIECZNOŚĆ STOSOWANIA KOMPENSACJI BŁĘDÓW

Każda obrabiarka ma określoną dokładność, z jaką wytwarza przedmioty, ponieważ bardzo trudno jest wyeliminować wszystkie błędy maszyny [28]. Z tego względu konstruktorzy stosują różne techniki zwiększania dokładności obrabiarek. W wielu przypadkach okazuje się jednak, że budowa bardzo dokładnej obrabiarki jest dużo bardziej złożona i co najważniejsze, bardziej kosztowna [28], niż zastosowanie metod kompensacji błędów do polepszenia jej dokładności. Kompensacja pozwala bowiem wytwarzać przedmioty z dużą dokładnością nawet przy wykorzystaniu maszyny o umiarkowanej dokładności [32]. Gdy maszyna nie jest w stanie wykonać przedmiotu w zadanej dokładności, można zastosować inną obrabiarkę, co często nie jest możliwe z wielu względów (dostępność maszyny, czas, układ w linii produkcyjnej) lub wykorzystać jedną z metod kompensacji błędów opisanych w dalszej części artykułu.

Z drugiej jednak strony należy pamiętać, że nie w każdym przypadku sama kompensacja przynosi oczekiwane efekty - może poprawiać dokładność tylko nieznacznie. Natomiast jej implementacja w obrabiarce wiąże się z przeprowadzeniem długotrwałych badań, testów i pomiarów. Generuje to zawsze dodatkowe koszty [27].

Jak wykazują jednak badania [5], w przypadku obróbki dokładnej i bardzo dokładnej kompensacja jest na ogół niezbędnym i najlepszym narzędziem poprawiającym jakość wykonywanych przedmiotów, ponieważ koszty wyprodukowania, a następnie eksploatacji „superprecyzyjnej” obrabiarki będą bardzo duże. Należy pamiętać, że zadaniem kompensacji jest tylko „poprawa” dokładności istniejącej konstrukcji, co jest zawsze zależne od wyjściowej dokładności maszyny, która powinna być możliwie największa, a przede wszystkim powtarzalna. Należy również pamiętać, że kompensacja powinna dotyczyć wszystkich znaczących błędów wpływających na dokładność obróbki [16]. Problem polega więc na tym, aby błędy występujące w obrabiarce były powtarzalne, ponieważ wtedy najłatwiej będzie je skutecznie kompensować.

2.2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA METOD KOMPENSACJI BŁĘDÓW

Dokładna, stabilna cieplnie obrabiarka [19], tzn. taka, która w małym stopniu podlega odkształceniom na skutek zmian temperatury, o powtarzalnym zachowaniu, stanowi dobrą bazę do wprowadzenia kompensacji błędów. Wraz z rozwojem techniki zmniejsza się koszt i poprawia dostępność układów mikroprocesorowych, precyzyjnych czujników pomiarowych oraz powstają nowe narzędzia analizy matematycznej, dzięki którym wprowadzenie kompensacji błędów staje się łatwiejsze.

Obecnie w wielu ośrodkach badawczych i firmach obrabiarkowych na całym świecie prowadzi się bardzo intensywne prace nad rozwojem metod kompensacji błędów.

Opracowano szereg wyrafinowanych modeli błędów w oparciu o zastosowanie różnego rodzaju narzędzi modelowania matematycznego. Do najważniejszych z nich należą:

- regresja liniowa i nieliniowa,
- sieci neuronowe,
- logika rozmyta,
- krzywe typu B-spline i powierzchnie NURBS,
- analiza składowych niezależnych („independent component analysis”),
- teoria systemu GST („grey system theory”),
- HTM (Homogenous Transformation Matrix).

W aplikacjach przemysłowych największe znaczenie ma regresja liniowa i nieliniowa, ze względu na prostotę modelu i łatwość implementacji. W ośrodkach badawczych prowadzi się również badania nad wykorzystaniem do kompensacji błędów sieci neuronowych i logiki rozmytej. W oparciu o wymienione narzędzia modelowania matematycznego zostały opracowane różne metody kompensacji błędów, z których najbardziej użyteczne zostały przedstawione w dalszej części artykułu.

Metoda kompensacji powinna być jak najmniej skomplikowana i na tyle uniwersalna, aby istniała możliwość stosowania jej w różnych typach obrabiarek. Wybór odpowiedniej metody kompensacji nie jest łatwy i zawsze powinien być poparty szeregiem analiz. Każda metoda kompensacji ma indywidualne cechy. Można do nich zaliczyć [29]: uniwersalność, niepewność / dokładność, czas realizowania kompensacji, sposób pobierania danych z obrabiarki. W oparciu o podane cechy można określić, czy dana metoda kompensacji będzie mogła być wykorzystywana w obrabiarce, czy jej zastosowanie przyniesie wystarczającą redukcję błędów, a przede wszystkim, czy czas konieczny do jej realizacji nie będzie zbyt długi. W taki sposób można dokonać optymalnego wyboru metody kompensacji i uniknąć stosowania metod, które nie odpowiadają parametrom danej obrabiarki i realizowanego procesu obróbki.

3. RODZAJE METOD KOMPENSACJI BŁĘDÓW

Istota metody kompensacji polega na pomiarze lub prognozowaniu w czasie rzeczywistym błędów obrabiarki i wprowadzeniu na tej podstawie odpowiedniej korekcji. W zależności od sposobu określania błędów rozróżnia się następujące metody kompensacji błędów:

- **metody bezpośrednie sensorowe -** bezpośredni pomiar błędów za pomocą czujników rozmieszczonych w przestrzeni roboczej obrabiarki,
- **metody pośrednie sensorowe -** prognozowanie błędów na podstawie modelu matematycznego, który wykorzystuje informacje np. z pomiaru temperatur w charakterystycznych miejscach konstrukcji obrabiarki,
- **metody pośrednie bezsensorowe -** prognozowanie błędów na podstawie modelu matematycznego, który wykorzystuje wyłącznie dane wewnętrzne maszyny, np. prędkość obrotową wrzeciona; w metodach tych nie używa się czujników pomiarowych umieszczonych w obrabiarce,

- **metody pośrednie hybrydowe -** prognozowanie błędów na podstawie modelu matematycznego, który wykorzystuje informacje np. z pomiaru temperatur w charakterystycznych miejscach konstrukcji obrabiarki i uwzględnia również dane wewnętrzne maszyny, np. prędkość obrotową wrzeciona,
- **inne metody.**

3.1. BEZPOŚREDNIE SENSOROWE METODY KOMPENSACJI BŁĘDÓW

W bezpośrednich metodach kompensacji błąd mierzy się okresowo na obrabiarce. Istotną zaletą tych metod jest bezpośredni pomiar błędu, który ma zostać skorygowany. Jako systemy pomiarowe najczęściej stosuje się urządzenia laserowe lub sondy pomiarowe. Konieczność dokonywania częstych pomiarów powoduje jednak przerwanie procesu skrawania i w konsekwencji zmniejszenie efektywności obróbki. Im większa jest częstotliwość dokonywania pomiarów, tym większa trudność stosowania tej metody. Ponadto pomiar błędów w przestrzeni roboczej obrabiarki stwarza sporo problemów ze względu na rozliczne zakłócenia spowodowane np. środkiem chłodzącym, wiórami, wirującym wrzecionem, osłonami itp. Ze względu na ograniczoną ilość miejsca w przestrzeni roboczej mogą również wystąpić trudności z zainstalowaniem odpowiedniego systemu pomiarowego. Rozpowszechnienie bezpośrednich metod kompensacji, mimo istotnych zalet, jest zatem dość ograniczone. Znajdują one zastosowanie głównie w szlifierkach.

3.2. POŚREDNIE SENSOROWE METODY KOMPENSACJI BŁĘDÓW

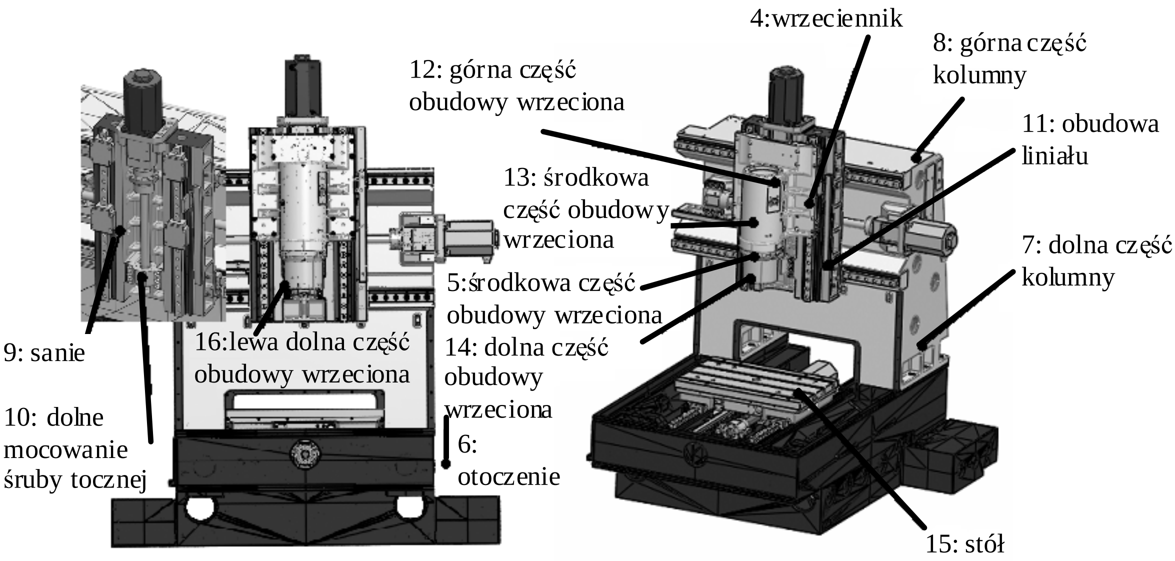
Z powyższych względów do kompensacji błędów są na ogół stosowane metody pośrednie, w których zamiast błędów mierzy się inne łatwiej mierzalne wielkości, np. temperatury w odpowiednich punktach obrabiarki [8], [9], [10], [22], [23], [24]. Błędy, które należy skorygować, prognozuje się w oparciu o matematyczny model błędu obrabiarki. Taki model należy opracować dla konkretnej obrabiarki. W pośrednich metodach kompensacji błędy są nadzorowane w czasie rzeczywistym niezależnie od procesu skrawania, bez konieczności jego przerywania dla dokonania pomiaru. Wadą metod pośrednich jest natomiast konieczność wyposażenia obrabiarki w kosztowne czujniki i układy pomiarowe.

3.2.1 METODY KOMPENSACJI OPARTE NA REGRESJI LINIOWEJ I NIELINIOWEJ

Pośrednie sensorowe metody kompensacji najczęściej wykorzystują regresję liniową lub nieliniową do wyznaczenia funkcji wielomianowej (modelu matematycznego), na podstawie której dokonywana jest korekcja błędów maszyny obróbkowej. Taka funkcja stosowana jest przede wszystkim do kompensacji błędów cieplnych. Danymi wejściowymi

funkcji są wartości temperatur pochodzące z czujników umieszczonych na obrabiarce, natomiast na wyjściu funkcja generuje wartość niezbędnych korekcji w osiach sterowanych.

Podstawowym problemem jest zlokalizowanie tych źródeł ciepła, które mają największy wpływ na zmianę dokładności na skutek zmiany temperatury. Dokonuje się tego na podstawie dokumentacji technicznej maszyny obróbkowej i analizy wyników pomiarów identyfikacyjnych. W miejscach, w którym wzrost temperatury w sposób istotny wpływa na błędy cieplne są instalowane czujniki temperatury. Na rys. 2 przedstawiono wysokoobrotowe centrum obróbkowe wraz z czujnikami do pomiaru temperatury poszczególnych elementów maszyny.

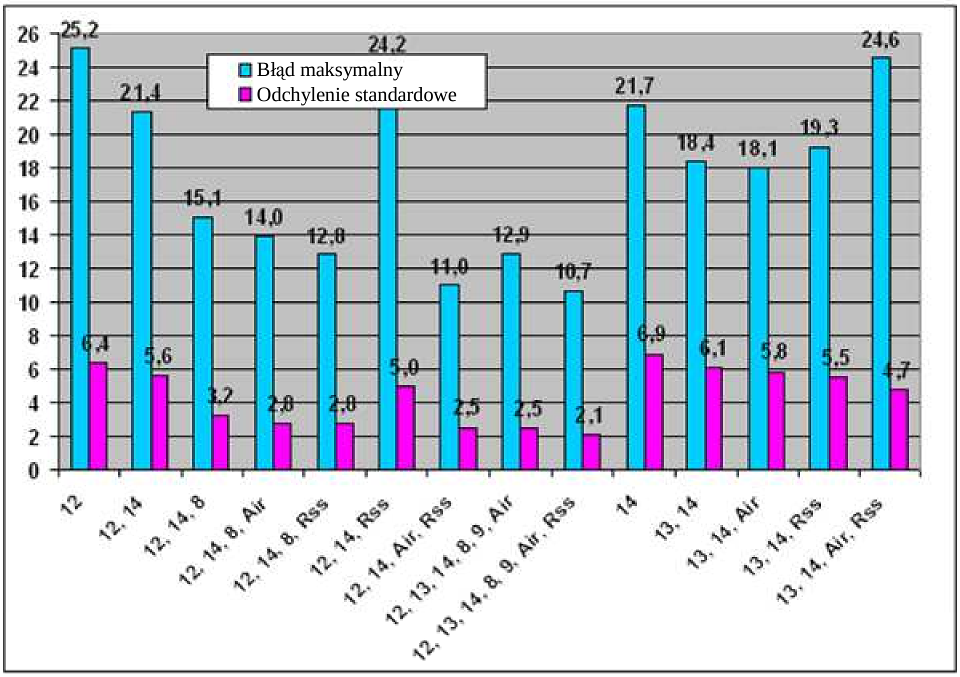


Rys. 2. Rozmieszczenie czujników temperatury [21]
Fig. 2. Location of temperature sensors [21]

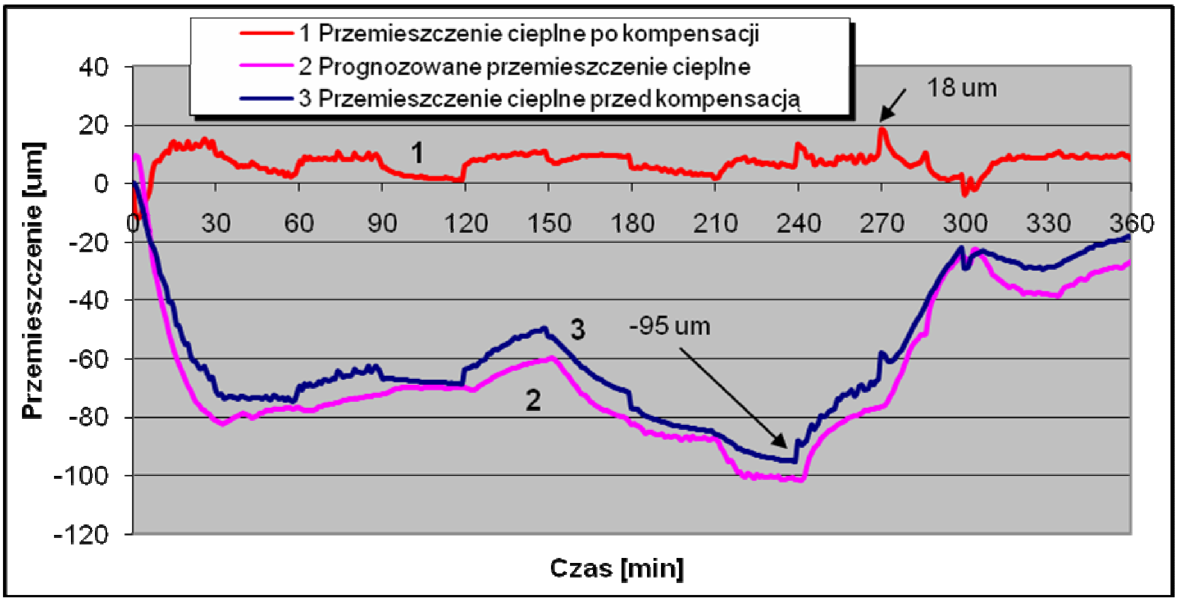
Czujniki pomiarowe dostarczają informacji o poziomie temperatur w wybranych punktach obrabiarki podczas jej eksploatacji. Liczba czujników musi być dobrana w sposób optymalny [11]. Należy uwzględnić tylko te czujniki, które są umieszczone w punktach, gdzie zmiana temperatury ma istotny wpływ na dokładność obrabiarki. W przypadku uwzględnienia zbyt dużej liczby czujników nadmiernie komplikuje się postać funkcji korekcyjnej i może pogorszyć się jej dokładność. Najlepsza metoda doboru liczby i miejsc pomiarów temperatury jest oparta na wykorzystaniu modelu symulacji cieplnego zachowania się obrabiarki. Na rys. 3 przedstawiono zależność zmiany dokładności funkcji korekcyjnej od stopnia jej skomplikowania tj. liczby punktów pomiaru temperatury. Po przeprowadzeniu analizy dokładności wielomianowej funkcji korekcyjnej jest określana jej ostateczna postać, która powinna być jak najprostsza [21], co pozwoli na jej łatwą implementację w układzie sterowania obrabiarki i umożliwi kompensację w trybie online.

Przykładowe rezultaty kompensacji przy zastosowaniu wielomianowej funkcji korekcyjnej przedstawiono na rys. 4. Porównano na nim zmierzone przemieszczenia cieplne końcówki wrzeciona po wprowadzeniu korekcji (krzywa 1), prognozowane przemieszczenia

cieplne końcówki wrzeciona za pomocą modelu błędów cieplnych (krzywa 2) i przemieszczenia cieplne końcówki wrzeciona bez korekcji (krzywa 3). Z porównania krzywych 1 i 3 wynika, że przemieszczenia cieplne końcówki wrzeciona w kierunku Z po zastosowaniu kompensacji zredukowano z ok. 95 µm do ok. 18 µm. Zastosowanie kompensacji zwiększyło więc kilkukrotnie dokładność obrabiarki.



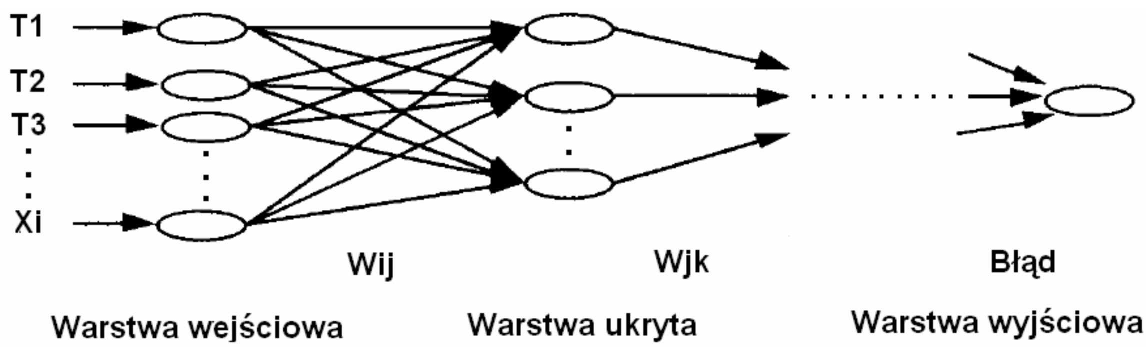
Rys. 3. Dokładność kompensacji [21]
Fig. 3. Compensation accuracy [21]



Rys. 4. Efektywność kompensacji przemieszczeń cieplnych wrzeciona centrum obróbkowego w kierunku Z [24]
Fig. 4. Efficiency of spindle thermal displacements compensation in direction Z [24]

3.2.2. METODY KOMPENSACJI OPARTE NA SIECIACH NEURONOWYCH

Sztuczna sieć neuronowa to struktura matematyczna, dzięki której można wykonywać różne operacje na danych wejściowych. W odróżnieniu od ogólnie stosowanych algorytmów przetwarzania informacji posiada ona zdolność uogólniania problemu na podstawie odpowiedniej ilości danych uczących. Każda sieć neuronowa składa się z trzech warstw: wejściowej, ukrytej i wyjściowej [25]. Liczba neuronów w warstwie wejściowej zależy od liczby badanych parametrów (wielkości wejściowych). Na wyjściu otrzymuje się wynik działania sieci (prognozowany błąd). Warstwa ukryta może składać się z dużej liczby neuronów. Złożoność tej części struktury zależy od stopnia skomplikowania rozważanego problemu. W praktyce rzadko stosuje się więcej niż trzy warstwy ukryte. Typowy schemat sztucznej sieci neuronowej przedstawia rys. 5.

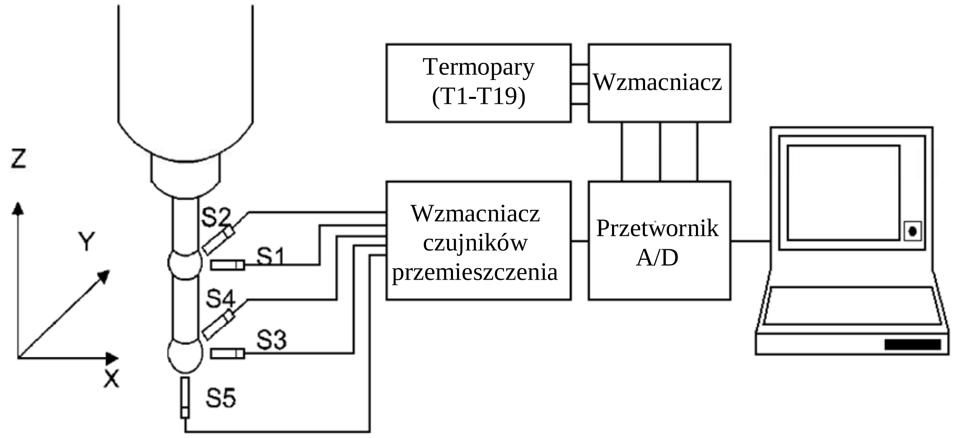


Rys. 5. Sieć neuronowa [25]
Fig. 5. Neural network [25]

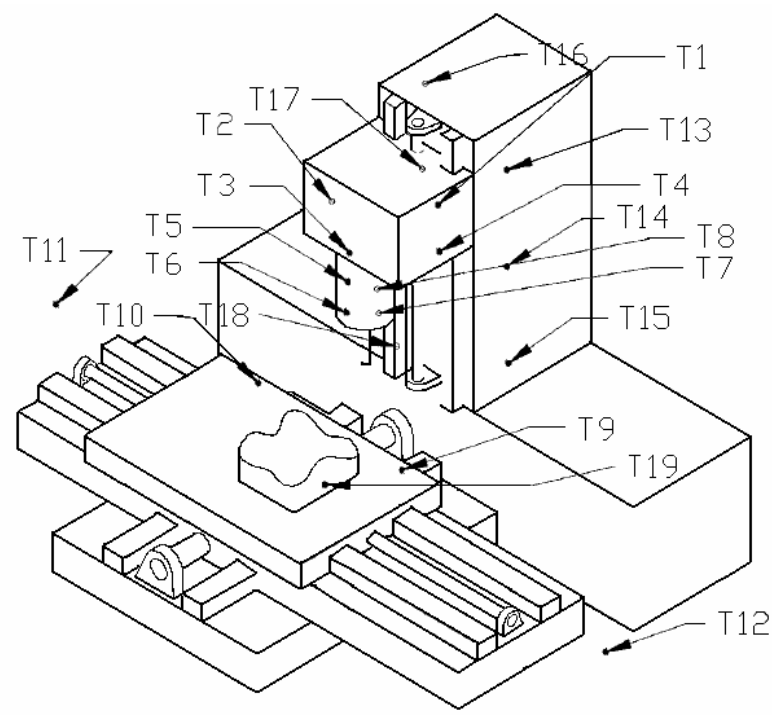
W przemyśle obrabiarkowym sieci neuronowe wykorzystuje się głównie do minimalizacji błędów cieplnych. Na podstawie danych dostarczonych z maszyny i systemu pomiarowego, które określają rzeczywiste położenie wrzeciona (rys. 6) i temperaturę elementów obrabiarki (rys. 7), można wyznaczyć różnicę między stanem rzeczywistym i oczekiwanym - błąd obrabiarki. Proces zbierania danych może być prowadzony ze stałą, wzrastającą lub losowo zmienianą prędkością obrotową wrzeciona [25]. Na podstawie zebranych danych należy nauczyć sieć, o jaką wartość ma zostać skorygowane położenie końcówki wrzeciona przy konkretnych parametrach pracy (położenie wrzeciona, temperatura otoczenia, prędkość obrotowa itp.). Proces gromadzenia danych może trwać od kilku do kilkudziesięciu godzin. Po tym czasie można uznać, że sieć będzie potrafiła uogólniać problem, tzn. dostarczać prawidłowe wartości kompensacji błędów dla nieznanych jej parametrów pracy.

Na podstawie badań eksperymentalnych [3], [25] można stwierdzić, że zastosowanie sieci neuronowej do kompensacji błędów może zwiększyć dokładność obrabiarki nawet o 75-80%. Powstaje jednak problem nieznanej (niejawnej) postaci funkcji, na podstawie której dokonywana jest kompensacja. Jeżeli nawet uda się uzyskać tę funkcję w sposób jawny, będzie ona dużo bardziej skomplikowana niż np. funkcja wielomianowa otrzymana

za pomocą analizy regresji. Utrudnia to możliwość implementacji w układzie sterowania maszyny i wymaga zastosowania dodatkowego zewnętrznego komputera. Innym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie procesorów sygnałowych DSP, które w porównaniu do standardowych procesorów mają możliwość wykonywania równoległych operacji matematycznych. Należy jednak pamiętać, że im prostsza funkcja, tym szybciej wykonywane są obliczenia.



Rys. 6. Rozmieszczenie czujników położenia wrzeciona [25]
Fig. 6. Location of spindle position sensors [25]

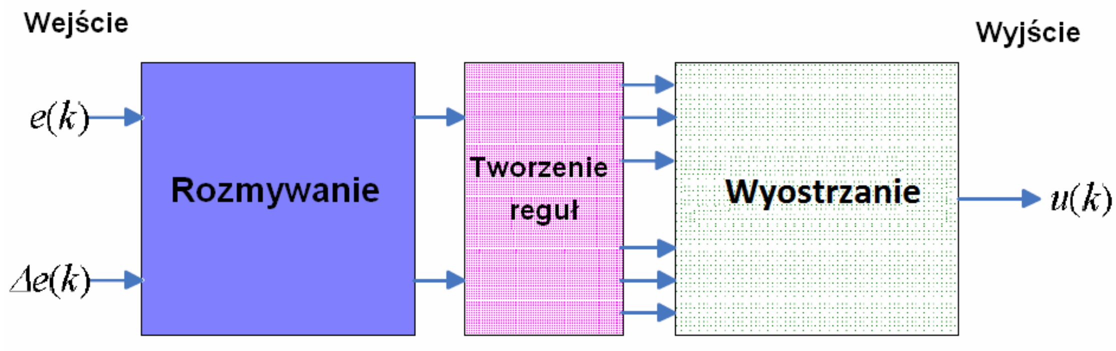


Rys. 7. Rozmieszczenie czujników temperatury [25]
Fig. 7. Location of temperature sensors [25]

3.2.3. METODY KOMPENSACJI OPARTE NA LOGICE ROZMYTEJ

Pierwsze badania nad zastosowaniem logiki rozmytej (fuzzy logic) rozpoczęto ok. 1990 roku. Ich celem było porównanie regulatorów opartych na logice rozmytej z regulatorami konwencjonalnymi. Obecnie logika rozmyta staje się coraz częściej alternatywą dla konwencjonalnej regulacji, ponieważ nie jest oparta na modelu matematycznym procesu, który w przypadku rozbudowanych systemów staje się nadmiernie skomplikowany. Takie rozwiązanie okazało się bardzo przydatne w zastosowaniach inżynierskich wszędzie tam, gdzie metoda klasyczna nie potrafi skutecznie opisać niejednoznaczności problemu [26]. Z tego względu projektanci coraz częściej wykorzystują ten sposób modelowania i sterowania w rozwiązaniach przemysłowych (sterowanie procesem, kontrola jakości) [33].

Strukturę regulatora rozmytego FLC (Fuzzy Logic Controller) przedstawia rys. 8. Składa się on z trzech bloków:
- bloku rozmywania zamieniającego wartości numeryczne na lingwistyczne,
- bloku wnioskowania wraz ze zbiorem reguł,
- bloku wyostrzania wyznaczającego wartości wyjściowe.



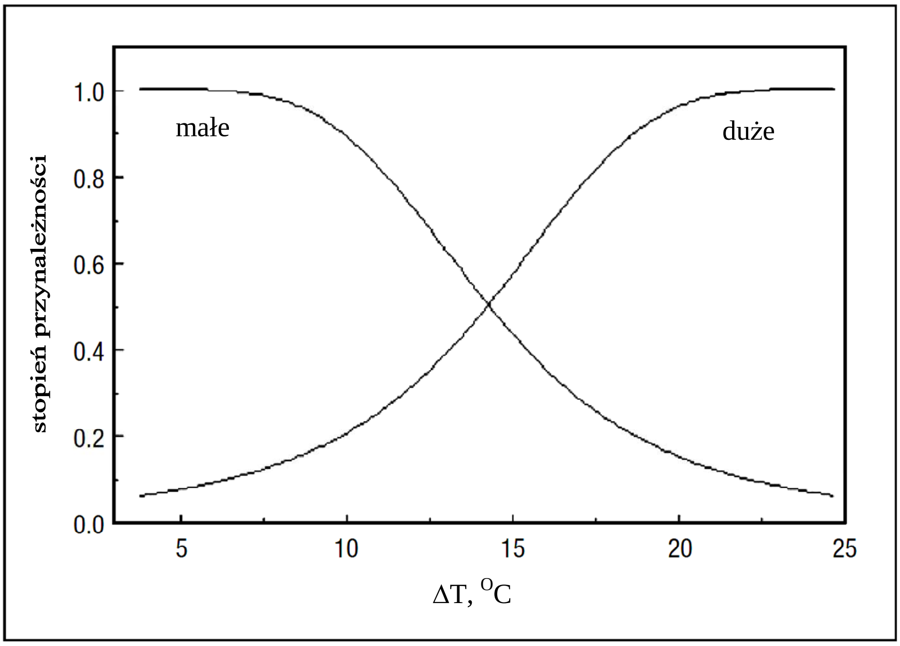
Rys. 8. Schemat systemu logiki rozmytej [33]
Fig. 8. Diagram of fuzzy logic control system [33]

Przykładem zastosowania logiki rozmytej jest kompensacja błędów cieplnych obrabiarki CNC [12]. Podobnie jak w przypadku metody regresji lub metody sieci neuronowych na maszynie umieszczono czujniki temperatury. Do pomiaru przemieszczeń cieplnych wrzeciona zastosowano czujniki bezdotykowe. W zależności od prędkości obrotowej wrzeciona i wartości posuwu wyszczególniono trzy obszary pracy obrabiarki.

Tabela 2. Zakresy pracy obrabiarki
Table 2. Machine tool operating ranges

	Prędkość obrotowa [obr/min]	Posuw [mm/min]
Postój	0	0
Wolna praca	600	508
Szybka praca	3000	2006

Poszczególne cykle pracy obrabiarki są włączane w kolejności losowej. Podczas każdego cyklu są zbierane informacje o temperaturach poszczególnych podzespołów maszyny i o przemieszczeniach cieplnych. Na tej podstawie można oszacować zależność przemieszczenia od temperatury. Początkowo na obrabiarce zamontowano dużą liczbę czujników temperatury, w tym przypadku 14. Dla takiej liczby czujników powstał jednak problem optymalizacji modelu. Z tego względu zastosowano tzw. wsteczną eliminację, czyli nie uwzględniono danych z tych czujników temperatury, które nie mają istotnego wpływu na położenie końcówki wrzeciona. Po dokonaniu optymalizacji wybrano trzy czujniki, dla których określono dwie wartości lingwistyczne - małe, duże (rys. 9).



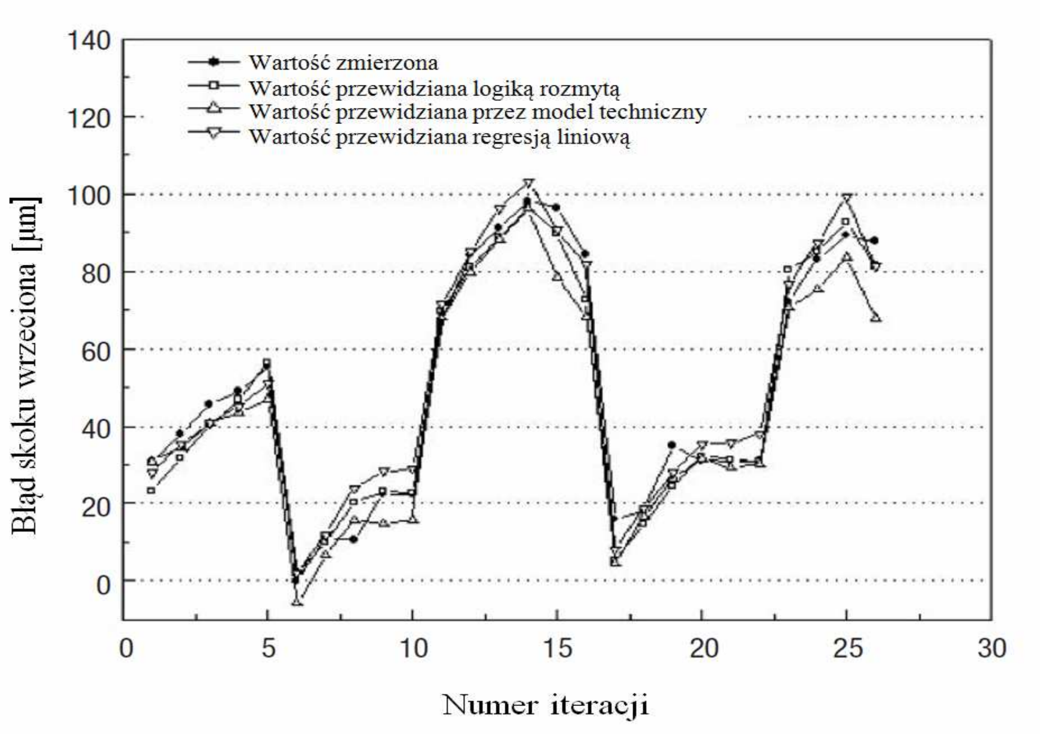
Rys. 9. Funkcja przynależności dla zmiennej ΔT [12]
Fig. 9. Membership function for the variable ΔT [12]

Wartości rozmyte wykorzystano następnie do utworzenia instrukcji warunkowych, których ogólną postać można zapisać jako:

Jeżeli ΔT jest małe, to przemieszczenie cieplne = ...
Jeżeli ΔT jest duże, to przemieszczenie cieplne = ...

gdzie ΔT jest przyrostem temperatury w punkcie pomiarowym, który ma najistotniejszy wpływ na zmianę położenia końcówki wrzeciona.

Do oceny poprawności modelu błędu wykorzystano nowe dane wejściowe. Rys. 10 przedstawia porównanie wartości błędu zmierzonego z błędem otrzymanym za pomocą modelu logiki rozmytej (3 czujniki temperatury), modelu regresji liniowej (4 czujniki temperatury) i za pomocą modelu tzw. oceny technicznej (4 czujniki temperatury).



Rys. 10. Porównanie zmierzonej wartości błędu z wartościami prognozowanymi za pomocą różnych metod [12]
Fig. 10. Comparison of the measured error values with the values predicted by different methods [12]

Na podstawie rys. 10 można stwierdzić, że logika rozmyta prawidłowo prognozuje wartości błędu przy równoczesnym wykorzystywaniu mniejszej liczby czujników (danych wejściowych). Kompensacja błędów cieplnych przy mniejszej liczbie czujników temperatury w porównaniu do innych metod jest korzystniejsza ze względu na zmniejszenie wpływu niepewności czujników i równocześnie powoduje obniżenie kosztów.

Logikę rozmytą można stosować wszędzie tam, gdzie nie jest możliwe stosowanie modelu matematycznego lub gdy model matematyczny mógłby być nadmiernie złożony. Dzięki swojej uniwersalności metody oparte na logice rozmytej mogą być stosowane w różnych obrabiarkach. Istotnym czynnikiem jest tutaj właściwe określenie reguł. Wymienione zalety powodują, że logika rozmyta ma obiecującą przyszłość w systemach sterowania i automatycznej kontroli.

3.3. BEZSENSOROWE METODY KOMPENSACJI BŁĘDÓW

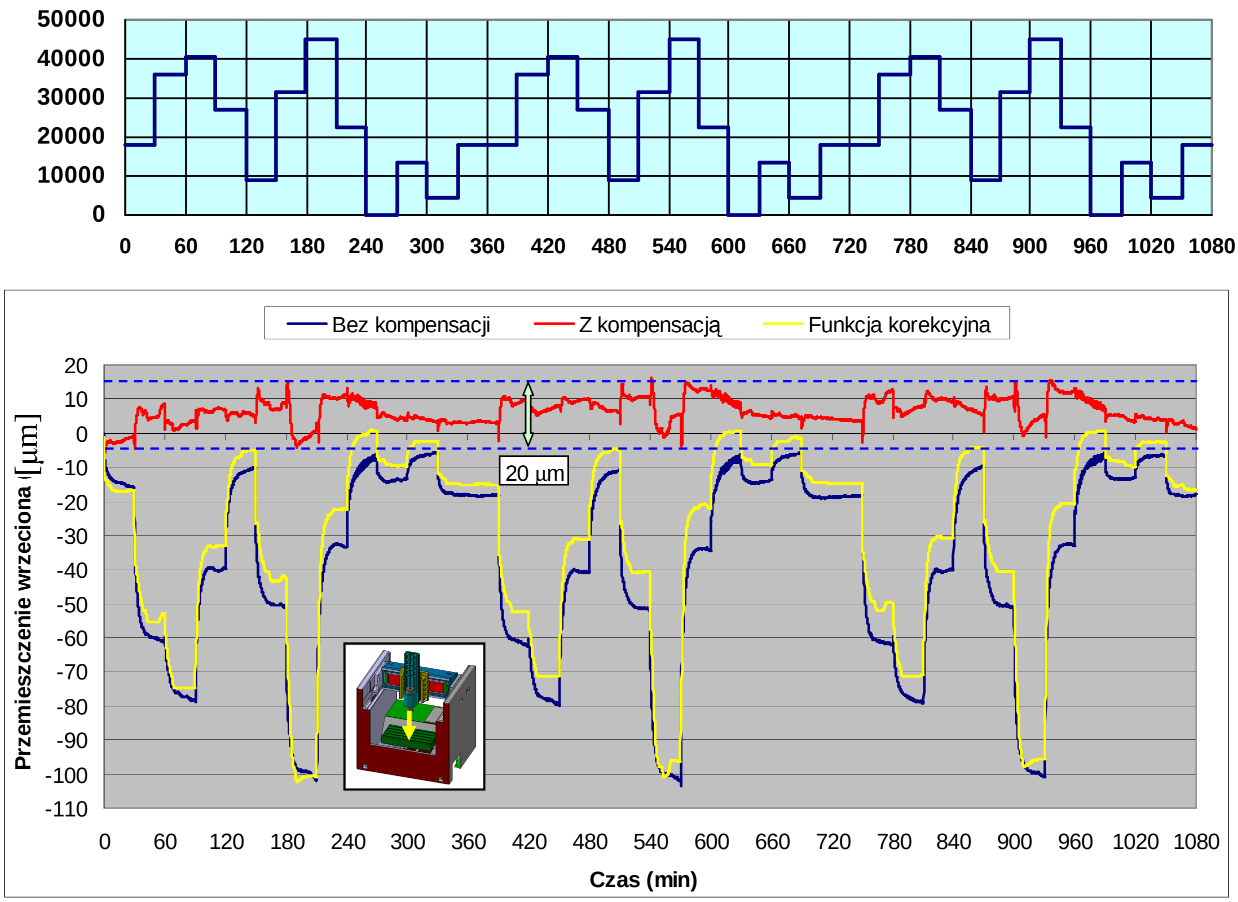
Firma Okuma przeprowadziła szereg prac badawczych [18], [30], w których sprawdzano możliwość zastosowania w obrabiarkach tzw. metody bezsensorowej. Metoda bezsensorowa polega na kompensacji błędów cieplnych obrabiarki w oparciu o dane wewnętrzne maszyny (np. prędkość obrotową), przy założeniu, że przemieszczenia cieplne są prawie powtarzalne. Aby tak było obrabiarka ma cieplnie symetryczną konstrukcję i poddana jest długotrwałym próbom w celu uzyskania powtarzalności przemieszczeń.

Stosowanie pomiarów wspomaga dokładna kompensację. Kompensacja jest realizowana na podstawie wyznaczonej eksperymentalnie charakterystyki cieplnej obrabiarki, która zależy od prędkości obrotowej wrzeciona. Jednak wg firmy Okuma metodę tę można stosować tylko w przypadku, gdy przebiegi temperatur i przemieszczeń odpowiadają przebiegom członu inercyjnego pierwszego rzędu i gdy są one powtarzalne. Wyniki badań doświadczalnych wskazują jednak, że takie przebiegi są trudne do uzyskania, a ponadto obrabiarki nie mają zwykle w pełni powtarzalnej i przewidywalnej charakterystyki cieplnej. Aby uzyskać pełną powtarzalność cieplnego zachowania się obrabiarki, należałoby stosować specjalne procedury indywidualnego doskonalenia każdej obrabiarki. W związku z tym w pełni bezsensorowe metody kompensacji błędów znajdują się obecnie w fazie badań wstępnych i są realne jedynie w przypadkach aktywnego korygowania rozkładów temperatur.

3.4. HYBRYDOWE METODY KOMPENSACJI BŁĘDÓW

Metody sensorowe i bezsensorowe używają zupełnie innych parametrów do wygenerowania funkcji korekcyjnej. Z tego względu powstała próba połączenia tych dwóch metod. W ten sposób opracowano tzw. kompensację hybrydową [20], która łączy metodę sensorową i bezsensorową, wykorzystując zarówno czujniki do pomiaru temperatury, jak i dane wewnętrzne maszyny (prędkość obrotową wrzeciona). Metodę hybrydową można skutecznie wykorzystać w obrabiarkach wysokoobrotowych. Na podstawie badań [2], [7], [20] stwierdzono, że w tych maszynach, oprócz błędów powodowanych przez odkształcenia cieplne, istotnym problemem jest występowanie nagłych skoków wrzeciona w kierunku osiowym (rzędu kilkunastu - kilkudziesięciu μm) po uruchomieniu obrabiarki z dużą prędkością obrotową lub po zmianie prędkości obrotowej wrzeciona. Błędy wynikające ze skoków wrzeciona nakładają się na błędy cieplne.

Hybrydowa metoda kompensacji wykorzystuje czujniki pomiaru temperatury do kompensacji przemieszczeń cieplnych, a dane wewnętrzne maszyny (prędkość obrotową wrzeciona) do kompensacji skoków wrzeciona. Na rys. 11 przedstawiono porównanie zmierzonych przemieszczeń wrzeciona bez kompensacji (linia ciemnoniebieska) z przemieszczeniami po kompensacji (linia czerwona) dla cyklu pracy obrabiarki pokazanego w górnej części rys. 11. Przemieszczenia prognozowane w oparciu o hybrydowy model błędów (funkcję korekcyjną) przedstawiono na rys. 11 linią żółtą. Błąd pozostały po wprowadzeniu kompensacji (linia czerwona na rys. 11) jest największy w momentach zmiany prędkości obrotowej wrzeciona na inną (co następuje co 30 minut), szczególnie w przypadku dużych zmian prędkości obrotowej wrzeciona. Jest to spowodowane nagłym skokiem wrzeciona, który w rozpatrywanym przypadku w ciągu kilku sekund może osiągnąć wartość nawet 30 μm, np. przy zmianie prędkości obrotowej wrzeciona z 0 obr/min na 45 000 obr/min lub odwrotnie. Niemniej jednak po zastosowaniu kompensacji osiągnięto bardzo znaczne zmniejszenie błędu, który wyniósł ok. 20% jego pierwotnej wielkości. Skoki wrzeciona (Shift) mogą być opisane dokładnym modelem [34], który można zintegrować z modelem błędu cieplnego. Wtedy skuteczność kompensacji osiowych przemieszczeń wysokoobrotowych wrzecion znacznie się zwiększy.



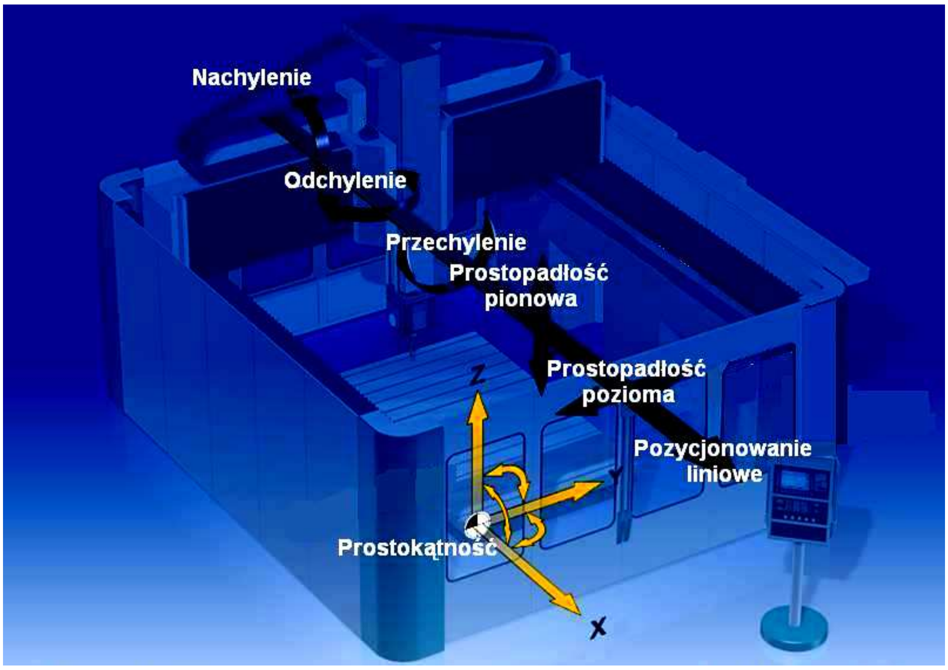
Rys. 11 Zmierzone i prognozowane przemieszczenia wrzeciona centrum obróbkowego [20]
Fig. 11. Experimentally identified and predicted machining centre spindle displacements [20]

3.5. INNE METODY KOMPENSACJI BŁĘDÓW

3.5.1. SYSTEM VCS (VOLUMETRIC COMPENSATION SYSTEM)

W 2008 roku na Międzynarodowych Targach Technologii Produkcyjnej firma Siemens Energy & Automation zaproponowała uzupełnienie wcześniej opracowanych przez siebie metod minimalizacji błędów obróbkowych. System kompensacji objętościowej VCS (Volumetric Compensation System) [1] współpracuje ze sterownikiem SINUMERIC 840D i jest wykorzystywany do kompensacji błędów geometrycznych, które mogą powodować złą orientację punktu środkowego narzędzia.

VCS wykorzystuje standardowy 21-parametrowy model błędów geometrycznych. Dzięki temu uwzględnione są zarówno błędy liniowe, jak i kątowe w maszynach 3- i 5-osiowych [1]. Rodzaje tych błędów przedstawia rys. 12. Główną zaletą tej metody jest ścisłe zintegrowanie macierzy błędu z powszechnie stosowanym w obrabiarkach sterownikiem Sinumeric 840D. Takie połączenie daje możliwość wykonywania algorytmów kompensacyjnych w czasie rzeczywistym.



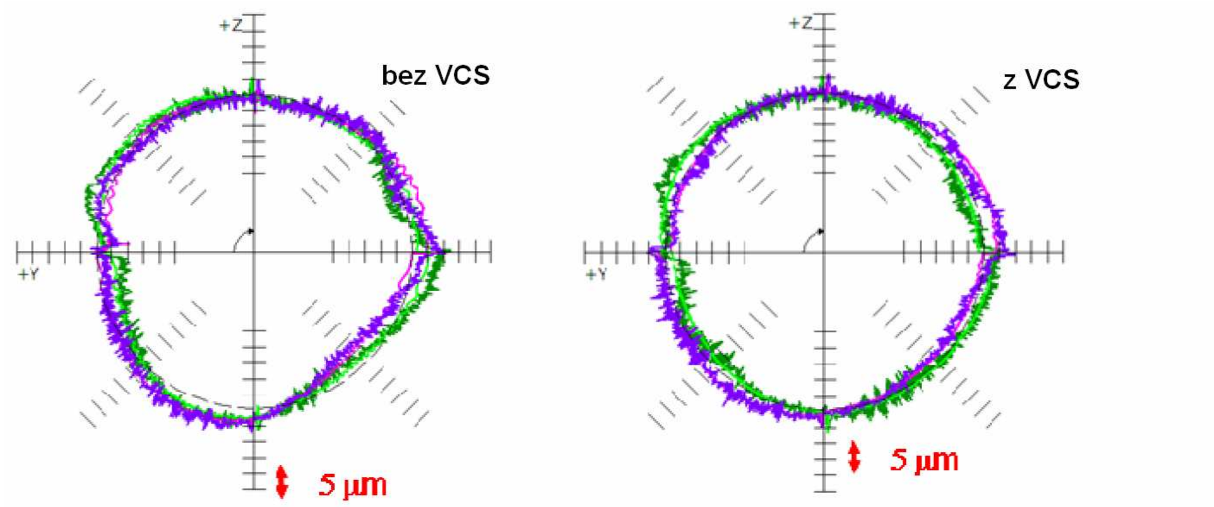
Rys. 12. Rodzaje błędów uwzględnianych przez VCS [2]
Fig. 12. Types of errors taken into account by VCS [2]

Aby zastosować metodę VCS, konieczne jest przeprowadzenie pomiarów w całej przestrzeni roboczej maszyny. Takie pomiary mogą być wykonywane przy użyciu interferometru laserowego. Zastosowanie tego rodzaju urządzenia daje możliwość szybkiego konwertowania otrzymanych wyników do standardu zgodnego ze sterownikiem Sinumeric 840D sl [2]. Dzięki temu można wprowadzić wysoki stopień automatyzacji operacji mierzenia.

Po uruchomieniu obrabiarki system VCS dokonuje kalibracji i określa wartości poszczególnych 21 składników błędu. Proces ten nie jest niczym innowacyjnym, ale Siemens zaproponował jego ścisłe zintegrowanie ze sterownikiem Sinumeric 840D sl, który ma wystarczającą moc obliczeniową, aby wykonywać algorytmy kompensacyjne w czasie rzeczywistym. Po zakończeniu tego procesu i osiągnięciu przez maszynę stanu gotowości do pracy zaczynają działać algorytmy sterujące systemu. Algorytmy te działają wewnątrz cyklu interpolacyjnego sterownika, aby dopasować zaprogramowaną i rzeczywistą lokalizację i orientację końcówki narzędzia.

Zastosowanie opisywanej metody powoduje zwiększenie dokładności średnio o 75-80% [1], ale zdarzają się też przypadki, gdzie zwiększenie dokładności jest jeszcze większe. Na przykład podczas jednego z testów na frezarce portalowej system VCS spowodował zmniejszenie błędu objętościowego w pełnym zakresie przestrzeni roboczej maszyny z 0,40 mm do mniej niż 0,025 mm. Należy wspomnieć, że system VCS został zastosowany jako dodatkowa metoda redukcji błędów na maszynach wyposażonych już w inne metody kompensacyjne powszechnie dostępne (korekcja błędów pozycjonowania, redukcja luzów zwrotnych w osiach sterowanych). Z tego powodu może okazać się dobrym narzędziem do zwiększania dokładności geometrycznej obrabiarki.

Rys. 13. przedstawia zmniejszenie błędu okrągłości przy zastosowaniu systemu VCS, co pozwala na uzyskiwanie znacznie dokładniejszej trajektorii kołowej.



Rys. 13. Błąd okrągłości w płaszczyźnie Y-Z bez zastosowania systemu VCS i z systemem VCS [2]
Fig. 13. Roundness error in the Y-Z plane - with and without VCS [2]

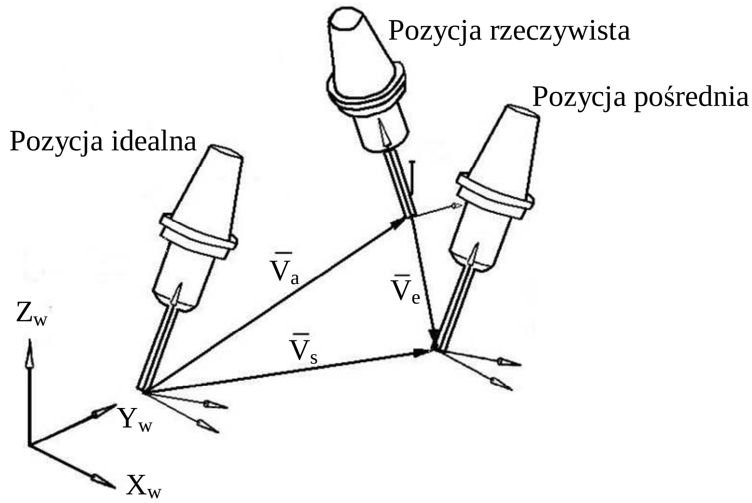
3.5.2 METODA ROZSPRZĘGANIA

Obecnie w przemyśle coraz większe zastosowanie mają obrabiarki 5-osiowe. Dzięki dwóm dodatkowym osiom obrotowym zapewniają odpowiednie prowadzenie narzędzia przy obróbce praktycznie dowolnej powierzchni. Podobnie jak w przypadku obrabiarek 3-osiowych również w obrabiarkach 5-osiowych występują różnego rodzaju błędy, które wymagają kompensacji. Ze względu na większą liczbę osi redukcja błędów w obrabiarkach 5-osiowych wymaga złożonych metod kompensacji.

W przypadku metody rozsprzęgania pomiary dokładności są wykonywane za pomocą sondy pomiarowej 3D. Szczegółowy opis jej użycia został przedstawiony w artykule [14]. Na podstawie pomiarów opracowano model błędu obrabiarki [13]. W celu uproszczenia modelu wcześniej skompensowano błędy luzu we wszystkich pięciu osiach i pominięto błędy cieplne.

Metoda rozsprzęgania oblicza wartości kompensacji oddzielnie dla osi liniowych i osi obrotowych. Najpierw obliczane są wartości kompensacji dla osi obrotowych, a następnie dla osi liniowych. Rys. 14 przedstawia położenia i orientacje końcówki narzędzia maszyny idealnej i rzeczywistej. Dzięki takiemu rozwiązaniu kompensacja położenia końcówki narzędzia obejmuje zarówno wektor błędu orientacji końcówki narzędzia V_e, jak i wektor błędu położenia końcówki narzędzia V_a. Można to przedstawić jako sumę wektorów:

$$\overline{V}_s = \overline{V}_a + \overline{V}_e$$



Rys. 14. Kompensacja błędu w metodzie rozsprzęgania [6]
Fig. 14. Error compensation in decouple method [6]

Mechanizm kompensacji w metodzie rozprzęgania składa się z czterech etapów:
- obliczanie kąta kompensacji w osi A,
- obliczanie kąta kompensacji w osi C,
- obliczanie liniowego przemieszczenia wynikającego z kątów kompensacji w osi A i C,
- obliczanie całkowitych wartości kompensacji w trzech osiach liniowych.

Badania eksperymentalne metody rozsprzęgania przeprowadzono na rzeczywistych obrabiarkach, aby obiektywnie ocenić jej zdolność do redukcji błędów. Na podstawie analiz stwierdzono, że ten sposób kompensacji może zwiększyć dokładność o 85-90% [6], ale dotyczy to jedynie błędu geometrycznego, zaś testy były wykonywane przy maksymalnych posuwach 10 mm/min i przy niewielkiej sile skrawania.

4. PODSUMOWANIE

Podstawowe znaczenie w kompensacji błędów ma opracowanie bardzo dokładnego modelu błędów, co na ogół jest zadaniem bardzo złożonym. Opracowano wiele metod kompensacji błędów, które pomyślnie zastosowano w systemach obróbkowych. Zwiększenie dokładności obrabiarek przy zastosowaniu tych metod wynosi od 35% do 90%. Poszczególne metody kompensacji mają jednak swoje ograniczenia, a ich zastosowanie może dotyczyć jedynie wybranych przypadków.

Obecnie wiele badań poświęca się rozwiązywaniu problemów związanych z doskonaleniem metod kompensacji. Prace te koncentrują się przede wszystkim na następujących zagadnieniach:
- opracowanie kompleksowego modelu błędów obejmującego błędy cieplne, geometryczne i błędy powodowane przez siły skrawania,
- rozwój modeli błędów niezawodnych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych,

- redukcja liczby potrzebnych czujników,
- optymalizacja rozmieszczenia czujników,
- doskonalenie niezawodności systemu kompensacji błędów w środowisku produkcyjnym,
- poszukiwanie nowych, efektywnych metod kompensacji błędów, również dla obrabiarek 5-osiowych.
-

Autorzy składają podziękowanie sponsorowi projektu pt.: „Wysokoobrotowe, precyzyjne pionowe centrum obróbkowe – inteligentna strategia kompensacji dla obrabiarek z napędami liniowymi" - Ministerstwu Nauk i Szkolnictwa Wyższego, w ramach którego wykonano niniejszą publikację.

LITERATURA

[1] Błędom obrabiarek mówimy NIE. http://www.designnews.pl.
[2] BRETSCHNEIDER J., Caution. With VCS machine tool precision can be increased. Siemens Industry Sector.
[3] CHEN J. S., Neural network-based modeling and error compensation of thermally-induced spindle errors. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 12, 1996, 303-308.
[4] FUNG E. H. K., CHAN J. C. K., ARX modelling and compensation of roundness errors in taper turning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16, 2000, 404-412.
[5] HANSEN H. N., CARMEIRO K., HAITJEMAN, DE CHIFFRE L., Dimensional micro and nano metrology. Annals of the CIRP, 55, 2006, 721-744.
[6] HSU Y. Y., WANG S. S, A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 2007, 352–360.
[7] JĘDRZEJEWSKI J., KWAŚNY W., Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high-speed spindles. CIRP Annals, 59, 2010, 377-382.
[8] JĘDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W., Improving machine tool accuracy using intelligent supervision model. CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Capri, 1998, 465-470.
[9] JĘDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W., Numerical analyses and compensation of HSC machine tool thermal displacements. 7th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM and Robotic Performance. LAMDAMAP, Cranfield, 2005, 268-275.
[10] JĘDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W., Compensation of thermal displacements of high-speed precision machine tools. Journal of Machine Engineering, 7, 2007, 108-114.
[11] LEE D. S., CHOI J. Y., CHOI D. H, ICA based thermal source extraction and thermal distortion compensation method for a machine tool. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 2003, 589–597.
[12] LEE J. H., LEE J. H., YANG S. H., Thermal error modeling of horizontal machining center using Fuzzy Logic Strategy. Journal of Manufacturing Processes, 3, 2001, 120-127.
[13] LEI W. T., HSU Y. Y., Accuracy test of five-axis CNC machine tools with 3D probe-ball, part II: errors estimation. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, 2002, 1163-1170.
[14] LEI W. T., HSU Y. Y., Accuracy test of five-axis CNC machine tools with 3D probe-ball, part I: design and modeling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, 2002, 1153-1162.
[15] LO C.H., Real-time error compensation on machine tools through optimal thermal error modelling. PhD dissertation, University of Michigan, 1994.
[16] KUMAR B, KUMAR A., Analysis of geometric errors associated with five-axis machining center in improving the quality of cam profile. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 2003, 629–636.
[17] MARCHELEK K., Projektowanie systemu obrabiarka - proces skrawania odpornego na drgania samowzbudne. Politechnika Poznańska.
[18] Materiały firmy Okuma Corporation, Method for compensating a component of a machine tool for displacement caused by heat. United States Patent, Patent Number: 5975112, 1998.
[19] MEKID S., Introduction to precision machine design and error assessment. CRC Press Taylor & Francis Group, Jędrzejewski J., Capture 3, 2009, 75-127.
[20] MODRZYCKI W., Identyfikacja i kompensacja błędów obrabiarek. Inżynieria Maszyn, 13, 3-4, 2008, 91-100.

[21] MODRZYCKI W., GIM T., Error compensation VMD 450 machining centre 20000 rpm. Report for Doosan Infracore, 2007.
[22] MODRZYCKI W., Überwachung und Kompensation thermisch bedingter Verformungen an Werkzeugmaschinen mit Hilfe von neuronalen Netzen und Regressionsanalyse. MATAR Conference, Praha 1996, 132-138.
[23] MODRZYCKI W., Machine tools thermal deformations - modeling and analyzing. International Intensive Course on Machine Tool and New Machining Technology. Changwon National University, Korea, 2002, 31-44.
[24] MODRZYCKI W., Kierunki rozwoju kompensacji błędów termicznych w obrabiarkach. Eksploatacja maszyn i wprowadzenie do obrotu. II Kongres nt. Maszyny XXI w., Inżynieria Maszyn, Wrocław 2004, 57-65.
[25] PARK H. J., LEE S. W., Thermal error measurement and real time compensation system for the CNC machine tools incorporating the spindle thermal error and the feed axis thermal error. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20, 2002, 487–494.
[26] Podstawy logiki rozmytej. Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej http://www.isep.pw.edu.pl/ZakladNapedu/dyplomy/fuzzy/podstawy_FL.htm.
[27] RAMESH R., MANNAN M. A., POO A. N., Support vector machines model for classification of thermal error in machine tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20, 2002, 114–120.
[28] RAMESH R., MANNAN M. A., POO A. N., Error compensation in machine tools – a review, part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 2000, 1235–1256.
[29] SCHWENKE H., KNAPP W., HAITJEMA H., WECKENMANN A., SCHMITT R., DELBRESSINE F., Geometric error measurement and compensation of machines—An update. CIRP Annals, 57, 2008, 660–675.
[30] SENDA H., SATO R., MORIWAKI T., Estimation of thermal displacement of machine tool spindles for mass production. Research & Development, OKUMA Corporation, No. 04-1289, 147-152.
[31] YUAN J., NI J., The real-time error compensation technique for CNC machining system. Mechatronics, 8, 1998, 359-380.
[32] WU S. M., NI J., Precision machining without precise machinery. Annals of the CIRP, 38, 1989, 533-536.
[33] WU H., LI G., SHI D., ZHANG C., Fuzzy Logic thermal error compensation for computer numerical control noncircular turning system. ICARCV, 10.1109, 2006.
[34] JĘDRZEJEWSKI J., KWAŚNY W., Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high-speed spindles. Annals of the CIRP, 59/1, 2010, 377-382.

ANALYSIS OF METHODS FOR THE COMPENSATION OF MACHINE TOOL ERRORS

The assurance of top-quality products requires improved machine tool accuracy. The accuracy of the machine tool is primarily effected by the geometric, thermal and others errors. One of the important trends in machine tool development is improving of machine tool design and development of error compensation techniques. This paper presents currently the most useful methods of machine tool error compensation and effectiveness and main constraints of compensation methods.